

坪頂淨水場軟化試驗研究

李丁來¹、黃茂琳²、蘇金龍³、林岳³、謝啓男⁴

¹工程師、²工程員、³經理、⁴副總經理

臺灣自來水公司

摘要

南化水庫與高屏溪攔河堰聯通管路計畫於八十九年九月奉行政院核定時，所著重者在臺南-高雄間水量調配，豐水期取用高屏溪水源最高至 200 萬 CMD，枯水期（十一月至五月）可引水量有限，則由南化水庫調蓄供應，年平均增加五十萬 CMD 水量，惟其對供水水質之影響則未述及，依據南化水庫與高屏溪攔河堰水源之清水分析資料顯示，南化水庫水源之清水總溶解固體量、總硬度、臭度，均低於高屏溪攔河堰水源之清水，雖均符合飲用水水質標準，但一般而言，民眾對總硬度之感受較明顯，故如欲使用高屏溪攔河堰水源之坪頂淨水場之總硬度，與南化水庫水源相近，則於該場實施軟化遂值得加以探討。

經研究結果顯示坪頂場經加 NaOH 軟化後，沉澱池出水濁度較未軟化者差，主要原因可能是 pH 提高後硬度成分析出反應時間不足，而膠沉池膠凝設備有明顯短流現象，致硬度成分析出後之膠凝時間可能不足，欲使膠沉效果良好，需降載增加膠凝時間，如採取分流軟化，則估計出水量為 46-50 萬 CMD，出水總硬度值約 140-150mg/L(as CaCO₃)，沉澱池出水濁度低於 8NTU。

關鍵字：總溶解固體量、總硬度、軟化、膠沉池

前言

高屏溪攔河堰工程已於八十八年九月完工取水，未來豐水期之最大取水能力可達每日二百萬立方公尺，惟枯水期因受水權及水文條件限制，可取之水量甚為有限，經經濟部水利處（九十一年一月改隸為經濟部水利署）檢討，若與南化水庫聯合運用，則可增加整體穩定供水量，即豐水期於高屏溪攔河堰取水供應，減少在南化水庫取用水量，並引甲仙堰原水蓄滿南化水庫；枯水期再由南化水庫調蓄供應，故經濟部水利處於八十九年八月提報「南化水庫與高屏溪攔河堰聯通管路計畫」⁽¹⁾，業奉行政院八十九年十月三十一日台八十九經字第三一二八四號函核定實施，計畫期程為九十年元月至九十二年十二月，為期三年，預期工程完工後，可增加南部地區穩定供水每日五十萬立方公尺，按區域分配原則，嘉南地區及高屏地區各增加每日二十五萬立方公尺之穩定供水，且高雄地區枯水期每日有五十萬立方公尺之用水可改由南化水庫水源供應；豐水期亦可視南部地區雨量豐沛與否等水文情況，彈性於南化水庫放水供應部份南部地區用水需求，對高雄地區之水質改善大有助益。

南化水庫與高屏溪攔河堰聯通管路計畫於八十九年九月奉行政院核定時，所著重者在臺南-高雄間水量調配，豐水期取用高屏溪水源最高至 200 萬 CMD，枯水期（十一月至五月）可引水量有限，則由南化水庫調蓄供應，年平均增加五十萬 CMD 水量，惟其對供水水質之影響則未述及。依據歷年來水質資料⁽²⁾⁽³⁾統計結果如圖 1 至圖 6 示，南化水庫與高屏溪攔河堰水源之清水分析資料顯示，南化水庫水源之清水總溶解固體量、總硬度、臭度，均低於高屏溪攔河堰水源之清水，雖均符合飲用水水質標準，但一般而言，民眾對總硬度之感受較明顯，故如欲使用高屏溪攔河堰水源之坪頂淨水場之總硬度，與南化水庫水源相近，則於該場實施軟化遂值得加以探討。

坪頂淨水場處理設備簡介⁽⁴⁾

坪頂淨水場處理流程及膠沉設備平面配置詳圖 7 所示，設備諸元資料如下：

- 1、處理能力：正常出水量 80 萬 CMD 最大出水量 100 萬 CMD
- 2、快混池：共二池，每池直徑 2.6m，高度 2.4m，正常出水量設計停留時間 2.65sec，最大出水量停留時間 2.12sec。
- 3、膠凝沉澱設備：共八方形池，每池長度 45.6m，有效水深 5.2m，正常出水量設計每池表面負荷率 50CMD/m²，設計停留時間 2.5hr，最大出水量每池表面負荷率 62.5CMD/m²，設計停留時間 2.0hr，每池均有獨立之進水管及控制閥。
- 4、快濾設備：共二十池，每池長度 17.9m，寬度 5.6m，正常出水量設計濾率 200m/day 最大出水量設計濾率 250m/day。
- 5、廢水處理系統：廢水池一池，每池直徑 20m，有效深度 3.8m，容量 1193m³，濃縮池二池，每池直徑 22.8m，有效深度 3.5m，容量 2850m³，污泥脫水機脫水能力，每天 150Ton（乾重）。
- 6、其他設計功能資料請詳表一。
- 7、處理流程：原水經前加氯、快混、膠凝沉澱、過濾後出水。

研究材料設備與方法

1、實驗室模擬試驗

坪頂淨水場沉澱處理設備為中央進流之正方形重力式膠凝池，故可以在實驗室以瓶杯(Jar-Test)方式，進行模擬實場加藥混凝操作情況，初步評估軟化所需藥品種類、劑量及加藥點。

(1)原水

取自坪頂淨水場之高屏溪攔河堰原水。

(2)混凝劑

爲了使試驗結果可直接應用於高屏溪水源，實驗進行時，使用來源相同於坪頂淨水場之 PACl 及鳳山淨水場之 Alum 混凝劑，加藥量皆以總量表示，加藥量則參照試驗當日坪頂淨水場之實際加藥量。

(3) 軟化用鹼劑

軟化用鹼劑採用常用⁽⁵⁾⁽⁶⁾之氫氧化鈣 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (Merck, Germany) 及氫氧化鈉 (NaOH) (Merck, Germany)，加藥量皆以總量表示。

(4) 瓶杯試驗

使用 Jar tester 進行混凝試驗，混凝劑或鹼劑注入在水樣之表面，快混 1 分鐘 ($G = 350 \text{ s}^{-1}$)，慢混 20 分鐘 ($G = 25 \text{ s}^{-1}$ ， $Gt = 30,000$)，慢混停止後分別在沉降 5 分鐘、10 分鐘及 20 分鐘時測殘餘濁度及總硬度。

2、現場模擬試驗

根據實驗室模擬試驗之結果，在不影響坪頂淨水場供水操作之原則下，選擇一組膠沉池進行實場加鹼劑軟化試驗，鹼劑加入點選擇在膠沉池進水渠入口處，可藉由水力進行快混後在膠沉池進行膠凝沉澱作用，每一小時量測膠沉池中心點 pH 值及膠沉池兩端出水匯合渠出水濁度、總硬度、總溶解固體量、pH 值。

結果與討論

1、實驗室模擬試驗

(1) 氫氧化鈣 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 軟化之瓶杯試驗初步結果

結果如圖 8 所示，取自現場業經加 PACl 加藥量 60mg/L 之混凝原水，進行添加氫氧化鈣之瓶杯試驗，加藥量分別爲 0、160、180、200、220、240、260mg/L，總硬度爲 278、186、168、160、152、139、133mg/L (as CaCO_3)，其中鈣硬度爲 156、98、104、88、86、70、82 mg/L (as CaCO_3)，非鈣硬度爲 122、88、64、72、66、69、51 mg/L (as CaCO_3)，顯示鈣硬度約佔 60%，非鈣硬度約佔 40%，總硬度、

鈣硬度、非鈣硬度之去除情形頗為一致，在氫氧化鈣加藥量 200mg/L 以下時，頗為一致，但氫氧化鈣加藥量超過 200mg/L 以上時，則總硬度之去除主要為非鈣硬度，鈣硬度之去除已屬有限，如需將硬度降低至 150mg/L 以下，則所需石灰加藥量須達 240mg/L 以上，而因氫氧化鈣溶解度低，未溶解氫氧化鈣造成沉澱後濁度，隨氫氧化鈣加藥量增加，由 20、310、310、350、360 升高至 370NTU，顯示未溶解氫氧化鈣除形成浪費外，將有一部分轉化為污泥，並將增加後續加酸降低 pH 設施及過濾處理設備之負擔。

(2) 氫氧化鈉軟化之瓶杯試驗初步結果

結果如圖 9 所示，取自現場業經加藥混凝之原水，進行添加氫氧化鈉之瓶杯試驗，加藥量分別為 0、40、60、80、100、120mg/L，總硬度為 260、196、160、120、96、76mg/L (as CaCO₃)，其中鈣硬度為 156、104、82、65、66、56mg/L (as CaCO₃)，非鈣硬度為 104、92、78、58、30、20mg/L (as CaCO₃)，總硬度、鈣硬度、非鈣硬度之去除情形，在氫氧化鈉加藥量 80mg/L 以下時，頗為一致，但氫氧化鈉加藥量超過 80mg/L 以上時，則總硬度之去除主要為非鈣硬度，鈣硬度之去除已屬有限，而水中 pH 隨氫氧化鈉加藥量 0、40、60、80、100、120 mg/L 增加，由 7.6、8.4、8.6、9.0、9.4 升高至 9.7，而總溶解固體量由 407、369、348、335、324、降低至 328mg/L，顯示總溶解固體量也具有約 20% 降低效果。但如需將硬度降低至 150mg/L (as CaCO₃) 以下，則所需氫氧化鈉加藥量須達 70mg/L 以上，如需將硬度降低至 100mg/L (as CaCO₃) 以下，則所需氫氧化鈉加藥量約 100mg/L，因氫氧化鈉易溶解，致不會有部分轉化為污泥之問題，後續處理之困擾較少。

(3) 由於中鋼公司水處理工場具有多年使用氫氧化鈣進行硬水軟化之經驗，經洽該公司水處理工場王耀煌工程師之實務經驗，雖然氫氧化鈣單位藥品價格便宜，但加藥設備時常故障，不易操作控制正確加藥量，污泥產生量也高，故建議本公司軟化藥品採氫氧化鈉進行實場軟化試驗評估。

(4) 綜合以上之實驗結果及分析，雖然傳統處理上係採氫氧化鈣作為軟化藥品，但基於其溶解度低及增加水中濁度、加藥初設費昂貴及所需工期長、加藥設備時常故障、氫氧化鈣容易吸收水氣而結塊、不易操作控制正確加藥量等供水操作問題，故後續採用氫氧化鈉進行實場軟化試驗。

2、實場試驗及其結果

為比較有無加氫氧化鈉軟化操作對坪頂淨水場膠凝沉澱池出水濁度及硬度之影響，故各選擇一池，進行加氫氧化鈉軟化及未加氫氧化鈉軟化平行操作，坪頂淨水場加氫氧化鈉軟化之加藥點，係位於膠凝沉澱池之各池獨立之進水管處，藉由水力動能攪拌方式進行混合，再進入膠凝沉澱池後，藉由原設攪拌機進行膠凝作用，然後進入池中沉澱區進行沉澱，且為了解膠凝沉澱池內有無短流問題，於加氫氧化鈉軟化之膠凝沉澱池，其四邊出水渠選擇二邊量測出流水之濁度及硬度，其結果如圖 10 及圖 11 所示，試驗當日高屏溪攔河堰原水濁度約為 44NTU，原水硬度約 232 至 260mg/L as CaCO₃，原水 pH 7.3 至 7.4，混凝劑 PACl 加藥量 60mg/L，氫氧化鈉加藥量 120mg/L，膠凝沉澱區 pH 約 9.1 至 9.9，軟化每處膠沉池處理量約 8 萬 CMD（表面負荷率 38.5m/day）。

(1) 坪頂場實場有無軟化膠凝沉澱池出水濁度歷時比較

圖 10 顯示，未實施軟化之膠凝沉澱池其出水濁度穩定維持在 6.9-8.6NTU 間，而實施軟化之膠凝沉澱池，其軟化池 A 邊出水濁度從開始加氫氧化鈉時之 9NTU，於兩小時內上升至最高 22NTU，於六小時後逐步降低至最低 10NTU，而後穩定維持在 10-12NTU，而且膠沉池兩邊之出水濁度並不相同，但具有相同之濁度降低趨勢，軟化池 B 邊出水濁度從開始加氫氧化鈉時之 9NTU，於三小時內上升至最高 17NTU，於六小時後逐步降低至最低 8NTU，而後穩定維持在 8-9NTU。

(2) 坪頂場實場有無軟化膠凝沉澱池出水硬度歷時比較

圖 11 顯示，未實施軟化之膠凝沉澱池其出水硬度維持 232 至 260mg/L as CaCO₃ 間，而實施軟化之膠凝沉澱池，其軟化池 A 邊出水硬度從開始加氫氧化鈉時之 236mg/L as CaCO₃，於六小時後逐步降低至最低 100 mg/L as CaCO₃，此時出流水 pH 約升高至 9.0(膠

凝區之 pH 為 9.8)，停止加氫氧化鈉後二小時，出水硬度隨之上升至 170mg/L as CaCO₃，出流水 pH 也降低至 8.1(膠凝區之 pH 因已未加鹼劑故降低至 7.2)，而膠沉池兩邊之出水硬度並不相同，但具有相同之硬度降低趨勢，軟化池 B 邊出水硬度從開始加氫氧化鈉時之 186 mg/L as CaCO₃，於六小時內逐步降低至最低 96 mg/L as CaCO₃，此時出流水 pH 約升高至 9.1(膠凝區之 pH 為 9.8)，停止加氫氧化鈉後二小時，出水硬度隨之上升至 132mg/L as CaCO₃，出流水 pH 也降低至 8.6(膠凝區之 pH 因已未加鹼劑故降低至 7.2)。

(3)從現場觀察，實施軟化後膠沉池膠凝區有大量而明顯之膠羽產生，未實施軟化者膠凝區未見明顯之膠羽，顯示軟化後大量之硬度成分析出，而提高膠羽碰撞頻率，致產生明顯膠羽，但坪頂場經加氫氧化鈉軟化後，沉澱池出水濁度較未軟化者差，主要原因可能是 pH 提高後，至硬度成分析出需約 1.5-2min，但本研究從每池膠沉設備之進水閘門處加入氫氧化鈉，從加入至流進膠沉池中心點停留時間僅約 1 min，致硬度成分析出反應時間可能不足，需在膠凝區再反應生成；再者，膠沉池膠凝設備之停留時間約 12min，而一般設計膠凝時間至少需 30min⁽⁷⁾ ⁽⁸⁾，且從池四邊溢流堰之出水濁度及硬度水不同研判，池內有明顯短流現象，致硬度成分析出後之膠凝時間可能不足。

(4)對照瓶杯試驗與實場試驗結果，可發現膠沉設備膠凝區之 pH 與沉澱區出流水之 pH，存在約 0.5 單位之 pH 值差距，而圖 9 瓶杯試驗之結果可用於解釋圖 11 實場試驗之結果，兩者均顯示膠沉設備膠凝區之 pH 控制非常重要，藉由控制膠沉設備膠凝區之 pH，就可預測沉澱區出流水之 pH 及硬度。

結論

- 1、傳統氫氧化鈣(石灰)軟化法，因石灰溶解度低，致未溶解石灰造成濁度升高至 370NTU，將有一部分轉化為污泥，除形成浪費外，也將增加後續處理之困擾，而採用氫氧化鈉軟化，則致不會有部分轉化為污泥之問題，後續處理之困擾較少。

- 2、因膠沉設備之膠凝時間不足，欲使膠沉效果良好，以現況而言，需降載增加膠凝時間至約 30min，採取分流軟化，即軟化六池（每池控制沉澱出水 pH 至 9.5 至 10.0，則出水硬度約為 70mg/L），每池出水 5 萬 CMD，共 30 萬 CMD，另二池不軟化，維持每池出水 8 萬至 10 萬 CMD（95%發生機率硬度值為 275mg/L），則合計出水量為 46-50 萬 CMD，出水硬度值約 140-150mg/L，沉澱池出流水濁度低於 8NTU。
- 3、對照瓶杯試驗與實場試驗結果，可發現膠沉設備膠凝區之 pH 與沉澱區出流水之 pH，存在一定差距，藉由控制膠沉設備膠凝區之 pH，就可預測沉澱區出流水之 pH 及硬度，可供設計及未來操作之參考。

簡易軟化設備工程建議方案及操作成本

1、軟化儲槽設備：

(1)根據實驗結果以 pH 控制加藥效果甚為準確，故參考瓶杯試驗結果 pH 控制 9.5 至 10.0，NaOH 加藥量約在 130mg/L，以軟化處理 30 萬 CMD 計算，商用 NaOH 約 45%，比重 1.45，NaOH 需求量約 87Ton/day（59m³/day），儲槽容量 500m³（250m³ 兩座）。

(2)由於分流軟化後混合水 pH 約 8.8，為避免 pH 超過 8 時，會使水中未軟化水中之 CaCO₃ 於清水池析出增加清水濁度，故需降低 pH 至約 7.5，H₂SO₄ 加藥量約在 50mg/L，以軟化處理 30 萬 CMD 計算，商用 H₂SO₄ 約 60%，比重 1.5，H₂SO₄ 需求量約 25Ton/day（16.7m³/day），儲槽容量 250m³ 一座。

2、軟化加藥設備：

(1) NaOH 加藥量約 59m³/day，共操作六池，加藥機能力至少 7L/min，選用至少 15L/min，考量提高操作彈性，每池均設置獨立之加藥機各二台，加藥點在每組膠沉池進水口處。

(2) H₂SO₄ 加藥量約在 50mg/L，加藥點在南、北膠沉池匯合渠適當處，加藥機能

力至少 6L/min，選用至少 12L/min，考量提高操作彈性，每組均設置獨立之加藥機各二台。

(3) 考量操作準確性，建請以設定 pH 方式自動控制酸鹼劑加藥量。

3、增設軟化設備工程方案概估操作成本

(1)NaOH 加藥費：

$$(87\text{Ton/day} \times 3.1 \text{ 元/KG}) \div (46\text{-}50 \text{ 萬 CMD}) = 0.54 - 0.58 \text{ 元/m}^3。$$

(2)H₂SO₄ 加藥費：

$$(25\text{Ton/day} \times 1.5 \text{ 元/KG}) \div (46\text{-}50 \text{ 萬 CMD}) = 0.08 \text{ 元/m}^3。$$

(3)污泥清運費：

$$(275\text{mg/L} - 75\text{mg/L}) \times 30 \text{ 萬 CMD} \times 800 \text{ 元/Ton} \div (46\text{-}50 \text{ 萬 CMD}) \div (60\% \text{ 含水率}) = 0.16 \text{ 元/m}^3。$$

(4)、污泥處理費及其他費用：0.2 元/m³。

(5)、現有傳統淨水處理費：約 0.5-0.7 元/m³。

(6)概估操作成本合計：約 1.4-1.6 元/m³。

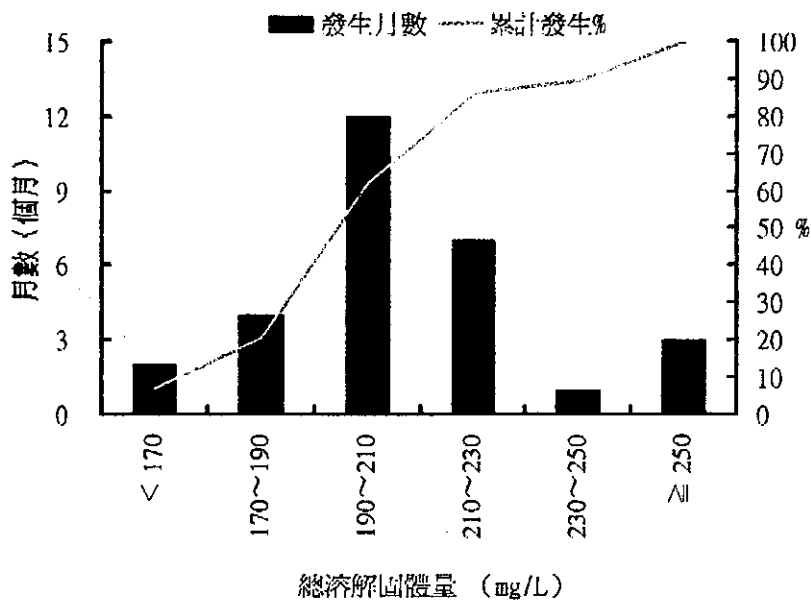
4、坪頂場污泥脫水機處理能力最高達 150Ton (乾重) /day，目前約僅處理 50Ton (乾重) /day，故尚有餘裕量，可供本場軟化污泥量約 60Ton (乾重) /day，但污泥收集平系統可能不足，需提高其排泥頻率。

致謝

感謝台灣自來水公司第七區管理處檢驗室及坪頂淨水場操作人員協助水質檢驗及軟化試驗之操作，使本研究得以在短時間內完成，謹此致謝。

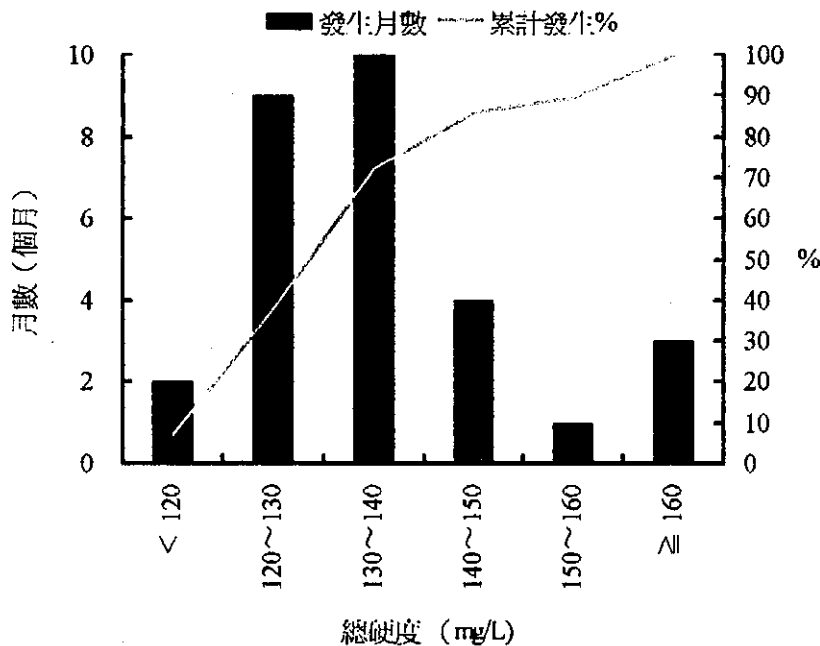
參考文獻

- 1、經濟部水利署，「南化水庫與高屏溪攔河堰聯通管路計畫」，2000。
- 2、財團法人中華顧問工程司&荷蘭商 DHV Water B.V.，「澄清湖、拷潭、翁公園淨水場增設高級淨水處理設備委託技術服務工程細部實施計畫」，台灣省自來水公司委託技術服務報告，2001。
- 4、台灣省自來水公司，臺灣省自來水公司水質年報，2002。
- 5、台灣省自來水公司，「坪頂淨水場工程合約」，1997。
- 6、中鼎工程股份有限公司、美商傑明(Montgomery Watson)工程顧問公司、開元工程顧問股份有限公司，「高雄區水質改善計畫—硬水軟化處理計畫工作期末報告」，台灣省自來水公司第七區管理處委託技術服務報告 1993。
- 7、Susumu Kawamura(1991)Integrated Design of Water Treatment Facilities，John Wiley& Sons, Inc.
- 8、中華民國自來水協會，「自來水設備工程設施標準解說」，1995。
- 9、AWWA(1999)，Water Quality & Treatment，McGraw-Hill Handbooks.



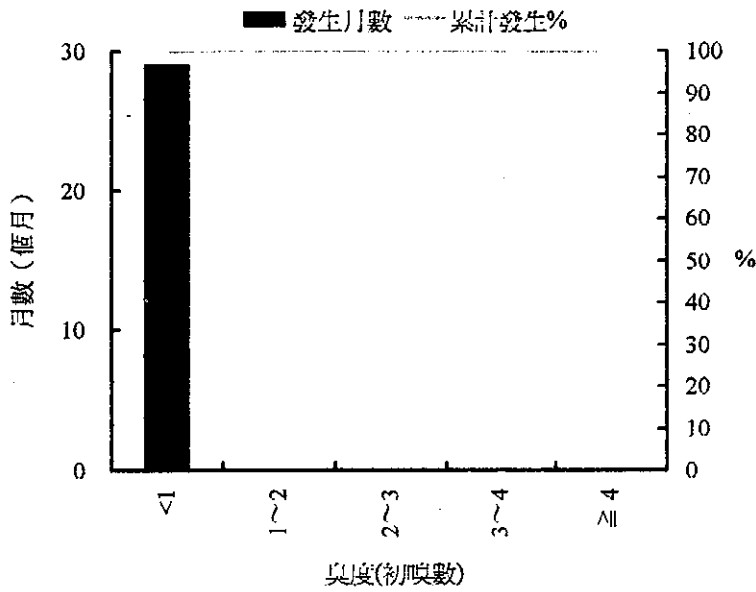
項目	mg/L
眾數	198
累計發生95%	259
累計發生90%	235
累計發生50%	202
累計發生10%	183
最大值	300
最小值	183
平均值	209

圖 1 南化水庫水源之清水總溶解固體量趨勢



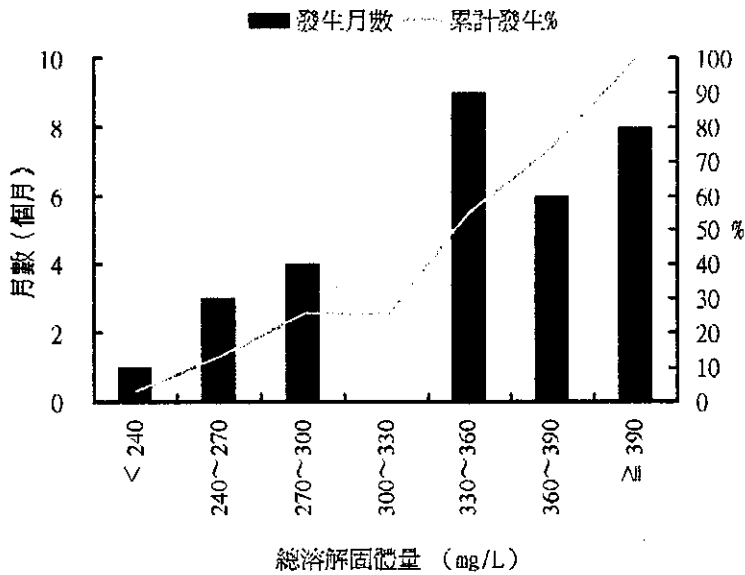
項目	mg/L
眾數	137
累計發生95%	166
累計發生90%	156
累計發生50%	133
累計發生10%	122
最大值	182
最小值	122
平均值	136

圖 2 南化水庫水源之清水總硬度趨勢



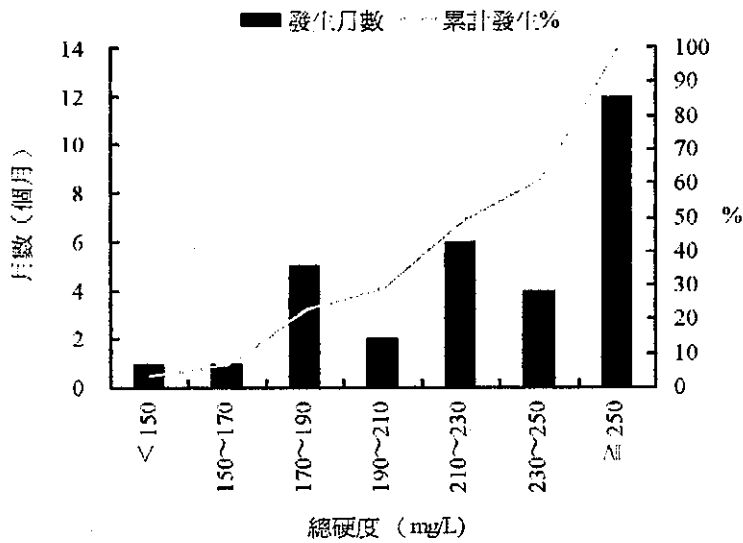
項目	TON
眾數	0
累計發生95%	0
累計發生90%	0
累計發生50%	0
累計發生10%	0
最大值	0
最小值	0
不均值	0

圖 3 南化水庫水源之清水臭度趨勢



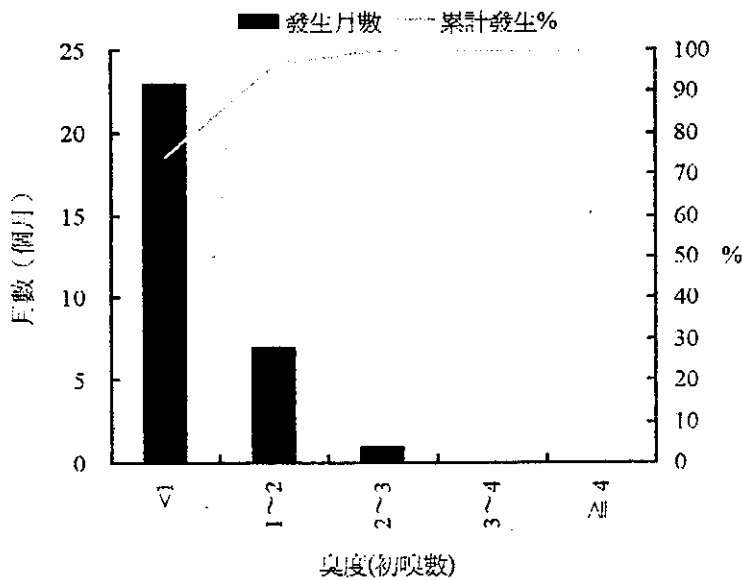
項目	mg/L
眾數	386
累計發生95%	413
累計發生90%	412
累計發生50%	358
累計發生10%	270
最大值	419
最小值	198
平均值	346

圖 4 高屏溪攔河堰原水之清水總溶解固體量趨勢



項目	mg/l.
眾數	180
累計發生95%	275
累計發生90%	272
累計發生50%	236
累計發生10%	180
最大值	278
最小值	148
平均值	229

圖 5 高屏溪攔河堰原水之清水總硬度趨勢



項目	TON
眾數	1
累計發生95%	2
累計發生90%	2
累計發生50%	1
累計發生10%	1
最大值	3
最小值	0
平均值	1

圖 6 高屏溪攔河堰原水之清水臭度趨勢

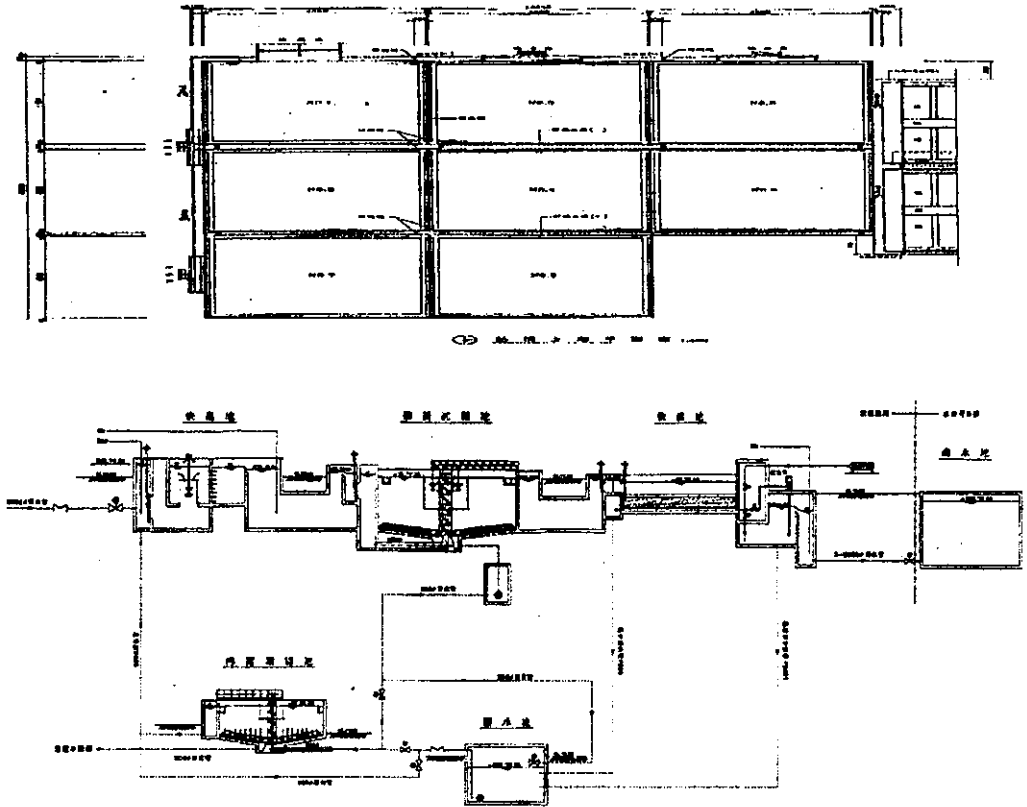


圖 7 坪頂淨水場處理流程及膠沉設備平面配置

表一、坪頂淨水場處理設備設計諸元

設計功能表

項 目	規 格	設 計 功 能	
		正常出水量	最大出水量
處理能力	出 水 量	800,000 CMD	1,000,000 CMD
	場內用水	30,000 CMD	40,000 CMD
	合 計	830,000 CMD	1,040,000 CMD
快 濾 池 (二池)	快濾池尺寸	每池 2.60m ϕ × 2.40m(H)	
	停留時間	2.65 sec	2.12 sec
膠 沉 設 備 (八池)	尺 寸	每池 45.60m × 45.60m × 5.20m(有效水深)	
	面 積	16634.88 M ²	
	容 積	66501.37 M ³	
	表面負利率	49.90 CMD/m ²	62.52 CMD/m ²
	停留時間	2.50 Hrs	2.00 Hrs
快 濾 池 (二十池)	尺 寸	每池 17.90m × 5.80m = 每池	
	面 積	4152.80 M ²	
	產 量	199.66 M ³ /d	250.43 M ³ /d

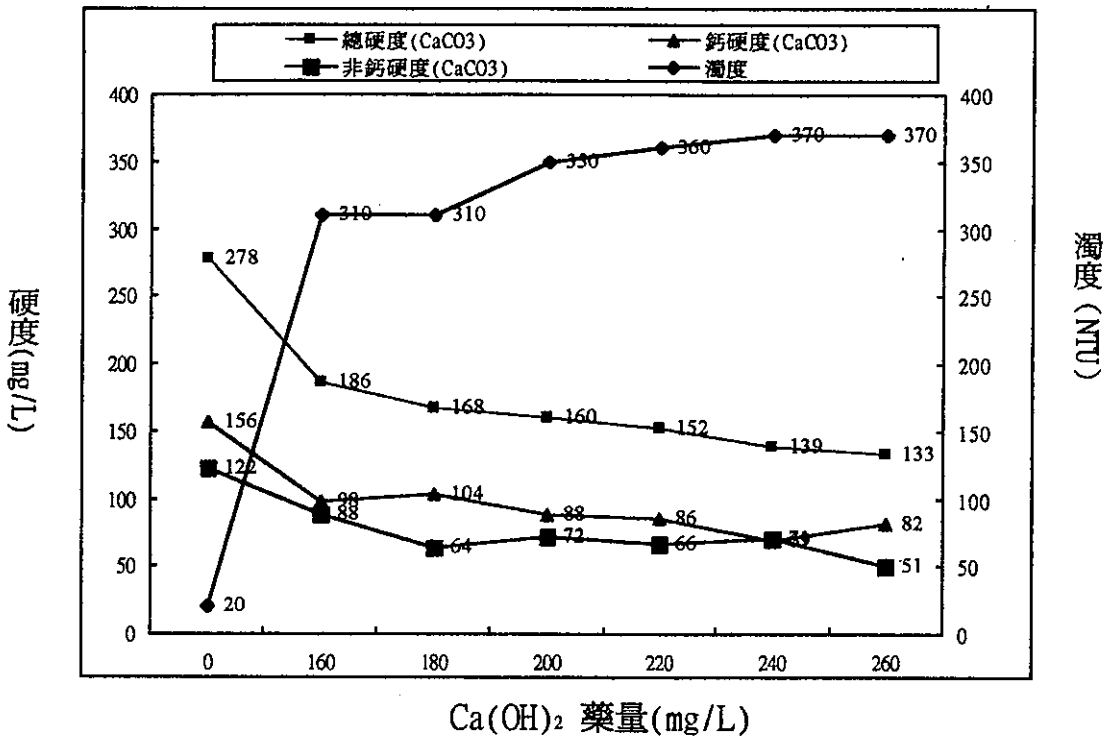


圖8、Ca(OH)₂ 藥量與軟化效果

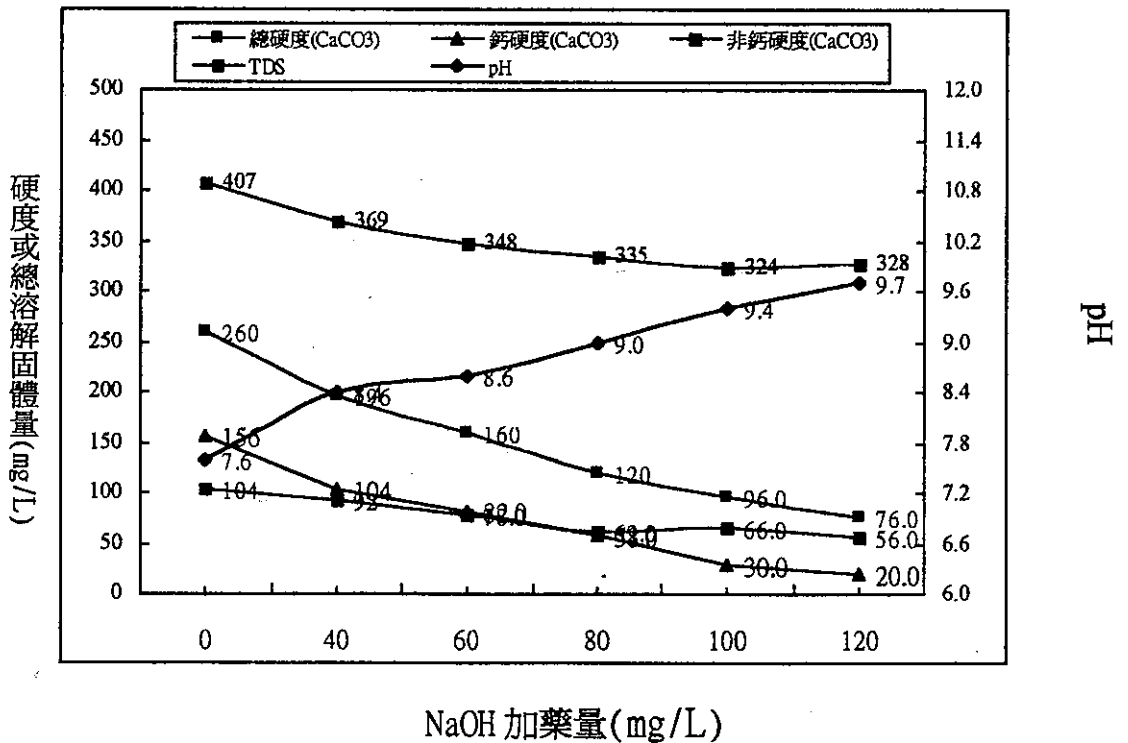


圖9、NaOH 加藥量與軟化效果

沉澱池出水濁度 (NTU)

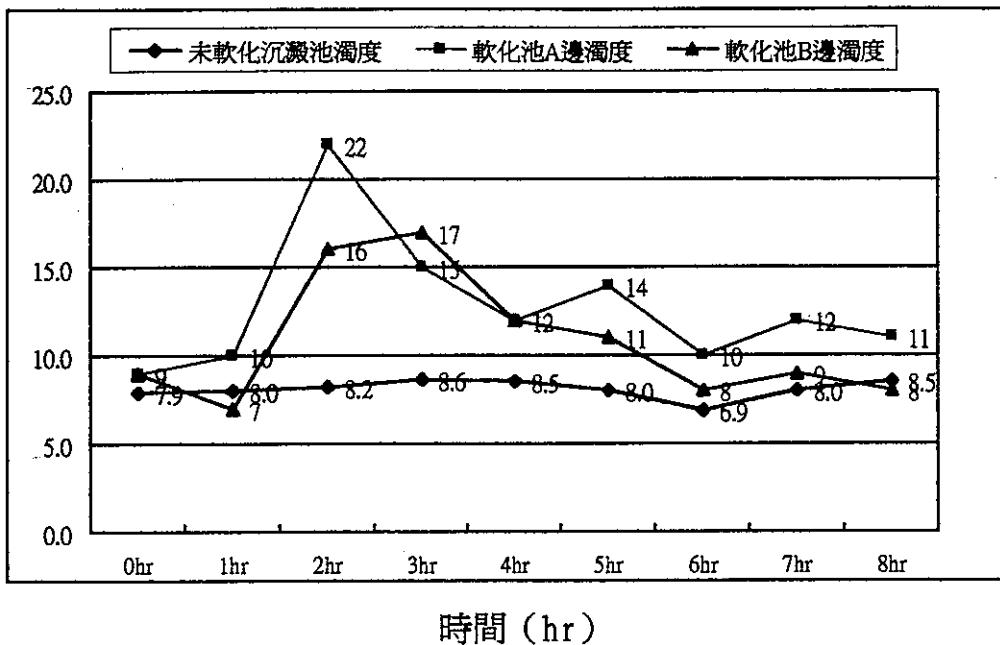


圖 10、坪頂場實場軟化沉澱池出水濁度歷時比較

沉澱池出水硬度 (毫克/公升)

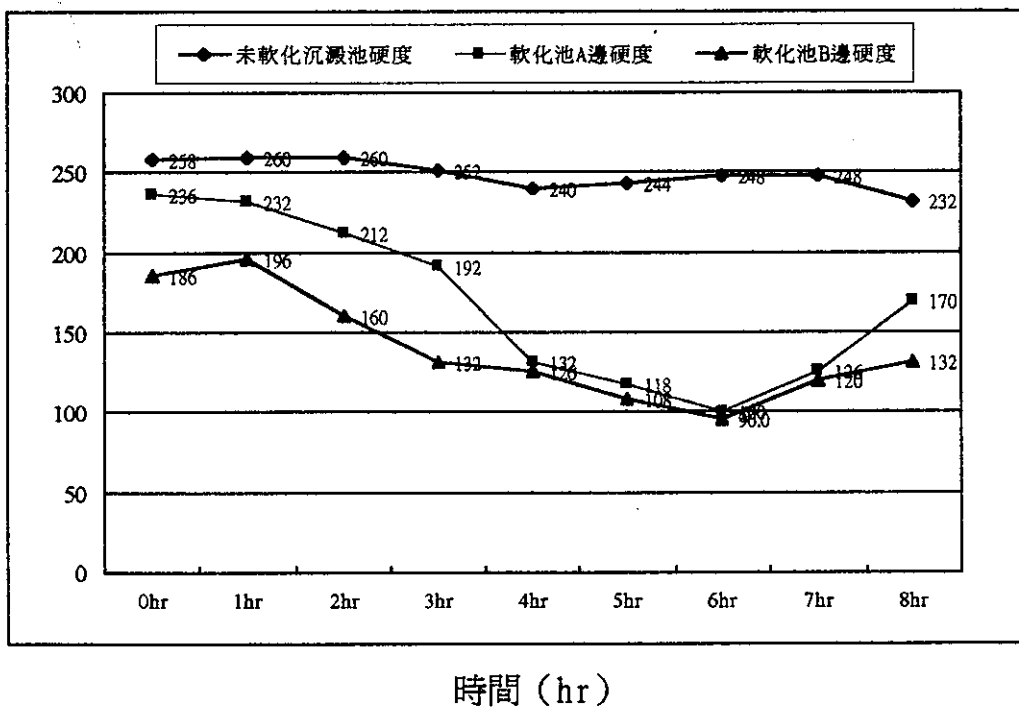


圖 11、坪頂場實場軟化沉澱池出水總硬度歷時比較